

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-082599

(43)Date of publication of application : 21.03.2000

(51)Int.Cl.

H05H 13/00  
H05H 7/04

(21)Application number : 10-248139

(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 02.09.1998

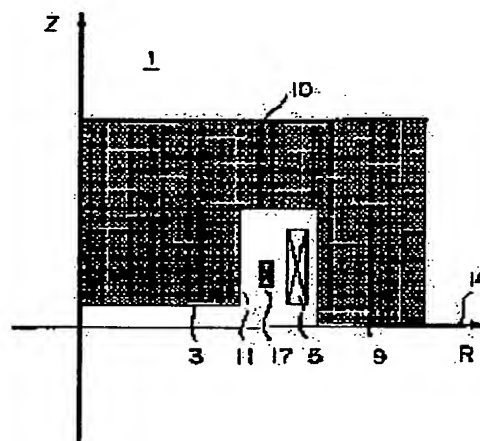
(72)Inventor : MATSUDA TETSUYA

## (54) ELECTROMAGNET FOR CIRCULAR ACCELERATOR

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To generate an intense magnetic field, by providing a main coil for generating a magnetic field for deflecting a beam and causing it to orbit on a beam orbital surface, alternately disposing acceleration cavities and magnetic poles along the orbiting direction of the beam, and inserting a correction coil between the periphery of the magnetic poles and the main coil.

**SOLUTION:** A correction coil 17 is also inserted between the magnetic-pole periphery 11 of magnetic poles 3 and a main coil 5, and magnetic fields generated by the correction coil 17 and by pole-face correction coils are increased as a whole, and therefore it is not necessary to increase the coil diameter of the pole-face correction coils. Because the correction coil 17 disposed near the main coil 5 or superconducting coil is easy to cool, it can be made up of a normal conduction coil, but if a large magnetic field is wanted, it can be made up of a superconducting coil. In general, the correction coil 17 is made up by disposing a pair of coils symmetrically about a mid-plane 14. If an asymmetric magnetic field running along a Z-axis is to be corrected, the correction coil 17 can be disposed asymmetrically about the mid-plane 14.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

05.11.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection] °

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-82599

(P2000-82599A)

(43) 公開日 平成12年3月21日 (2000.3.21)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テラコト\* (参考)

H 0 5 H 13/00

H 0 5 H 13/00

2 G 0 8 5

7/04

7/04

審査請求 未請求 請求項の数7 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号

特願平10-248139

(22) 出願日

平成10年9月2日 (1998.9.2)

(71) 出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(72) 発明者 松田 哲也

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三

菱電機株式会社内

(74) 代理人 100057874

弁理士 曾我 道照 (外6名)

Fターム (参考) 2G085 AA13 BC04 BC09 BC11 BC18

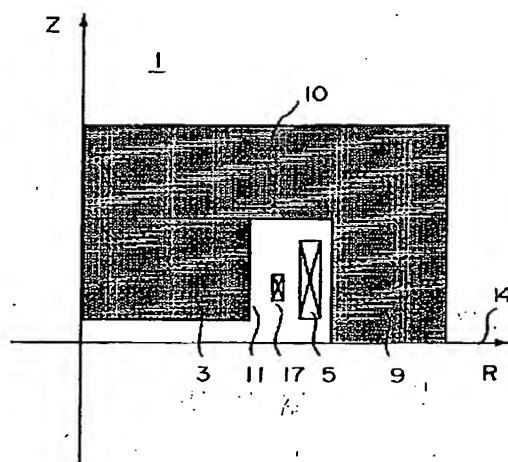
EA02 EA07

(54) 【発明の名称】 円形加速器用電磁石

(57) 【要約】

【課題】 円形加速器用電磁石において、補正コイルの発生磁界を増強させる。

【解決手段】 電磁石の中心に注入されたビームを偏向させてビーム軌道面上を周回させる磁界を発生させる主コイル5と、ビーム軌道面上を周回中にビームに電界を与え、ビーム進行方向に加速する加速空洞と、ビームの周回方向に沿って前記加速空洞と交互に配置される磁極3を備え、磁極3の外周と主コイル5との間に補正コイル17を挿入した。



- 1 : 円形荷電粒子用電磁石
- 3 : 磁極
- 5 : 主コイル
- 9 : ヨーク
- 11 : 磁極外周
- 17 : 補正コイル

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 電磁石の中心に注入されたビームを偏向させてビーム軌道面上を周回させる磁界を発生させる主コイルと、ビーム軌道面上を周回中にビームに電界を与え、ビーム進行方向に加速する加速空洞と、前記ビームの周回方向に沿って前記加速空洞と交互に配置される磁極を備え、前記磁極の外周と前記主コイルとの間に補正コイルを挿入したことを特徴とする円形加速器用電磁石。

【請求項2】 補正コイルを磁極の周面方向に沿って複数に分割して挿入し、この分割した補正コイルの少なくとも一部で電流値または電流方向を異ならせたことを特徴とする請求項1に記載の円形加速器用電磁石。

【請求項3】 ビームの周回面を対称面とし、この対称面を介して対向配置された第1の補正コイル群と第2の補正コイル群との間で電流値が同一の補正コイルを電流源に対して直列接続したことを特徴とする請求項1または2に記載の円形加速器用電磁石。

【請求項4】 補正コイルは円筒状の巻枠にコイル巻線を巻回して形成した後に、円筒内に磁極挿入させることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の円形加速器用電磁石。

【請求項5】 回転ガントリーに搭載された際に、補正コイルの電流値を前記回転ガントリーの回転角度に応じて可変させる制御手段を備えたことを特徴とする請求項1ないし4のいずれかに記載の円形加速器用電磁石。

【請求項6】 補正コイルは磁極面とビーム軌道面との間に配置したことを特徴とする請求項5に記載の円形加速器用電磁石。

【請求項7】 補正コイルは加速空洞表面近傍に配置したことを特徴とする請求項5に記載の円形加速器用電磁石。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は患部に照射する荷電粒子を取り出す円形加速器用電磁石に関するものである。

【0002】

サイクロトロン

【従来の技術】従来の円形加速器用電磁石として、Proposal for a Manufacturing Prototype SUPERCONDUCTING CYCLOTRON for Advanced Cancer Therapy, MSUC-874 L, February, 1993, p2, Fig. 1に示されたものが知られている。

【0003】図12は従来の円形加速器用電磁石の全体構成を示す斜視図である。図において、1は電磁石、2は電磁石1の中心、3は磁極、5は主コイル（図の例では超電導コイル）、6はZ軸であり、円形加速器用電磁石の中心軸である。7は加速空洞、9はヨーク天板、1

0がヨーク、11は磁極外周部、12は補正鉄板である。

【0004】磁極3は通常鉄で構成する。Z軸に沿って対称に配置した磁極3間には大きな吸引電磁力がZ軸方向に働くため、磁極3を分厚い鉄であるヨーク天板9及び、ヨーク10で支持する。このためヨーク天板9、ヨーク10の重量の合計は、一般的に数十トンになる。

【0005】図13は実験物理学講座28、加速器（共立出版）11章p448の図11-76図に示された別の円形加速器用電磁石である。図において、13は磁極面補正コイル、15は加速空洞部補正コイルである。

【0006】図14は図13に示す円形加速器用電磁石において、特に磁極3及び磁極面補正コイル13の断面図を模式的に示した図である。円形加速器用電磁石のZ軸の中心点をミッドプレーン14と呼ぶが、磁極面補正コイル13は、磁極3とミッドプレーン14間の磁極表面にコイル巻線を配置する。ミッドプレーン14は、加速されるビームが周回する面であり、ビーム軌道面とも呼ぶ。なお、R軸が径方向である。

【0007】図15は同じく図13に示す円形加速器用電磁石において、特に加速空洞部7及び加速空洞部補正コイル15、16の断面図を模式的に示した図である。加速空洞部補正コイル15は、加速空洞7とミッドプレーン14との間にコイル巻線を、加速空洞部補正コイル16は加速空洞7とヨーク天板9との間にコイル巻線を挿入する。

【0008】図16は図12に示す円形加速器用電磁石の磁極3、補正鉄板12の断面図を模式的に示した図である。次に円形加速器用電磁石の動作について、主に図12に示す円形加速器用電磁石を用いて説明する。図12の例ではビームを偏向させる磁界を発生する主コイル5は超電導コイルであり、1対のソレノイドコイルで形成されている。

【0009】電磁石の中心2に入射されたビームは、主コイル5が発生する磁界により偏向され図15に示すビーム軌道面14上を周回する間、加速空洞7にてビーム進行方向（円周方向）の電界を受けビーム進行方向（径方向R）に加速される。電磁石の中心2の近傍から磁極外周部11直前の範囲では、加速空洞7を通過する度に、ビームが加速されビームのエネルギーが大きくなる。ビームのエネルギーが大きくなるとビームの軌道半径は大きくなる。即ち軌道は螺旋を描きながら大きくなる。

【0010】ビームの軌道半径が磁極外周部11付近になると、加速空洞7がなくなるため、ビームは加速されなくなる。また、磁極3がなくなるため磁界は急速に減少する。これにより、ビームはもはや偏向されなくなるとはほぼ直進し、電磁石の外周に取り出される。この磁界が急激に減少しはじめる位置を、以下ではビーム取り出

し半径と呼ぶ。このビーム取り出し半径は、ほぼ磁極外周部 11 の半径に等しい。なお、図 12、13 の例では加速空洞 7 と磁極 3 とは周方向に交互に配置する。これらの図に示す例では、加速空洞 7 と磁極 3 とは Z 軸に対し 3 回対称に交互に配置している。

【0011】次に、AVF(サイクロトロ)について説明する。このタイプの円形加速器では、加速空洞 7 の周波数を一定にする。これにより加速空洞の Q 値を上げ、大きな加速電界を得ることが可能になる。加速空洞の周波数を一定にするにはビームの周回周波数を一定にする必要がある。ビームの周回周波数  $w$  と Z 軸方向の磁界(周方向へ平均した磁界)  $B_z(r)$  とは、以下の関係がある。

$$【0012】 w = q B_z(r) / m$$

【0013】ここで、 $q$  は荷電粒子の電荷であり、 $m$  はビームの質量である。ビームの質量  $m$  はビームのエネルギーの増加即ちビームの軌道半径  $r$  の増加と共に増加する。ビームの周回周波数  $w$  を一定にするには、 $B_z$  も  $r$  と共に増加する磁界分布にする必要がある。この磁界を等時性磁界と呼ぶ。実際の周方向に平均した磁界は、正

【0014】なお、図 12 に示す磁極 3 の目的の一つは上記等時性磁界の作成である。このため、 $r$  が大きくなるとともに磁極 3 とビーム軌道面間のギャップを小さくしたり、 $r$  と共に磁極 3 の幅を広くする等を行う。特に、ビーム取り出し半径である磁極外周部 11 近傍において、上記ギャップは数 10 mm と僅かな隙間になる。

【0015】厳密にこの径方向と共に増加する磁界を得るには、現状の 3 次元磁界計算コードでは精度が不足している。このため、磁界測定の実測に基づき、磁界分布を補正する必要がある。

【0016】以上は、磁界  $B_z(r)$  を等時性磁界へ近づけるには補正が必要なことを述べた。次に、補正が必要な別の磁界について述べる。径方向の半径が一定位置における、周方向への磁界分布  $B_z(\theta)$  において、 $\cos \theta$  あるいは  $\sin \theta$  で変化する磁界を 1 次のハーモニック磁界と呼ぶ。この磁界が存在すると、ビームの共鳴が生じ荷電粒子径が増大し荷電粒子が失われる。

【0017】特に、この 1 次のハーモニック磁界はビームの取り出し半径近傍で小さな値にする必要がある。この磁界もある仕様(通常 1 から 2 Gauss 程度)まで補正する必要がある。取り出し半径近傍の最大磁界は、超電導電磁石の場合最大 4 T 程度にあるため、この値は非常に厳しい値である。このため、等時性磁界作成と同様に磁界測定に基づく補正が必要である。

【0018】以下、これらの磁界の補正の手段について、図 13 から図 16 を用いて述べる。図 13 には、等時性磁界補正用のコイルが種々示されている。まず、13 は磁極面に配置する磁極面補正コイルである。この磁極面補正コイル 13 の断面を模式的に示した図が図 14

である。磁極面補正コイル 13 により、Z 方向の磁界を発生させることができる。電流を変えたコイルを多数配置すれば、径方向に沿って変化する種々の磁界分布を発生でき、上記等時性磁界を発生できる。

【0019】次に、図 13 には加速空洞部補正コイル 15 がある。この加速空洞部補正コイル 15 は加速空洞部近傍の空いたスペースに配置される。加速空洞部補正コイル 15 の断面を模式的に示した図が図 15 である。図 15 において、加速空洞部補正コイル 15 はミッドプレーン 14 と加速空洞 7 間にコイル巻線を、図 13 で図示されないが、加速空洞部補正コイル 16 は加速空洞 7 とヨーク天板 9 間にコイル巻線を配置する。

【0020】但し、加速空洞部補正コイル 15、16 は、一般に周方向に対し磁極が存在するため、周方向に沿って全面的に配置できず、図 13 の例では、3 回対称配置になる。これらのコイルも磁極面補正コイル 13 と同様に、多数のコイルを配置し、各コイルの電流値を変化させることにより、等時性磁界を補正することができる。

【0021】ところで、図 13 の例では、主コイル 5 は常電導電磁石であり、磁界強度は最大でも 2 T 程度である。この場合、補正は加速空洞部補正コイル 15、16 でも充分対応可能であった。ところが、図 12 の様な超電導コイルの場合には、磁界強度が 4 T 近くなり、補正のための磁界強度も大きくする必要がある。

【0022】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、図 12 で示す様な超電導コイルの場合には、磁界強度が 4 T 近くなると、図 13 に示した加速空洞部補正コイルでは磁界強度が足らず、補正が完全にできない場合がある。即ち、図 14 に示すように磁極面補正コイル 13 では磁極 3 とミッドプレーン 14 間の隙間にコイル巻線を配置するが、この隙間は以前述べた様に、取り出し半径位置では数 10 mm と狭い。

【0023】また、通常磁極は常温のため、磁極面補正コイルは常電導コイルであり、大きな磁界の発生には、大きな断面積が必要である。従って、大断面積の磁極面補正コイルを上記隙間に挿入できず大きな磁界強度を得ることができないという問題がある。図 15 に示す加速空洞部補正コイル 15 の場合も同様な問題点が生じる。

【0024】更に、図 15 に示す加速空洞部補正コイル 16 の場合は、加速空洞 7 とヨーク天板 9 間に大きな隙間があるため大断面積のコイルの配置可能である。しかしながら、加速空洞部補正コイル 16 の配置場所がビーム軌道面 14 から離れているため、ビーム軌道面 14 にある大きな磁界を発生させようとした場合、大きな起磁力が必要であるという問題点があった。

【0025】上記の様に、常電導のコイルでのハーモニック磁界の補正に限界があるため、図 12 に示す円形加速器用電磁石では補正鉄板 12 を磁極 3 の表面に貼るこ

とによりハーモニック磁界を補正していた。この様子を模式的に示した図が、図16である。磁極3の外周部11に補正鉄板12を貼る様子が示されている。この補正鉄板12は、特に1次のハーモニック磁界の補正に有効で、周方向に鉄を非対称に貼ることにより、誤差磁界を補正できる。

【0026】しかしながら、図12に示す様に、磁極3はヨーク天板9に支持されており、ヨーク天板9はヨーク10に支持されている。補正鉄板12で磁界分布を補正して誤差磁界を補正しようとする、図12に示す様にヨーク天板9をヨーク10から分解し、手作業で補正鉄板12を磁極3の外周部11の表面に貼る必要がある。ところがこのヨーク天板9、磁極3は重量が一般に数十トンと非常に大きく、ヨーク天板9の分解には大変な手間を要し、容易に補正鉄板12を磁極3の外周部11の表面に貼ることができないという問題点がある。

【0027】この発明は上記のような問題点を解消するためになされたもので、特にビーム取り出し半径付近で、磁界を補正するために充分な強度の磁界を発生させることができる補正コイルを備えた円形加速器用電磁石を得ることを目的とする。

【0028】

【課題を解決するための手段】請求項1の発明に係る円形加速器用電磁石は、電磁石の中心に注入されたビームを偏向させてビーム軌道面上を周回させる磁界を発生させる主コイルと、ビーム軌道面上を周回中にビームに電界を与え、ビーム進行方向に加速する加速空洞と、前記ビームの周回方向に沿って前記加速空洞と交互に配置される磁極を備え、前記磁極の外周と前記主コイルとの間に補正コイルを挿入したものである。

【0029】請求項2の発明に係る円形加速器用電磁石は、補正コイルを磁極の周面方向に沿って複数に分割して挿入し、この分割した補正コイルの少なくとも一部で電流値または電流方向を異ならせたものである。

【0030】請求項3の発明に係る円形加速器用電磁石は、ビームの周回面を対称面とし、この対称面を介して対向配置された第1の補正コイル群と第2の補正コイル群の間で電流値が同一の補正コイルを電流源に対して直列接続したものである。

【0031】請求項4の発明に係る円形加速器用電磁石は、補正コイルは円筒状の巻枠にコイル巻線を巻回して形成した後に、円筒内に磁極挿入させたものである。

【0032】請求項5の発明に係る円形加速器用電磁石は、回転ガントリーに搭載された際に、補正コイルの電流値を前記回転ガントリーの回転角度に応じて可変させる制御手段を備えたものである。

【0033】請求項6の発明に係る円形加速器用電磁石において、補正コイルは磁極とビーム軌道面との間に配置したものである。

【0034】請求項7の発明に係る円形加速器用電磁石

において、補正コイルは加速空洞表面近傍に配置したものである。

【0035】

【発明の実施の形態】実施の形態1

以下、この発明の実施の形態1を図について説明する。図1は本実施の形態に係る円形加速器用電磁石の断面図である。尚、図中、図14～16と同一符号は同一又は相当部分を示す。本実施の形態においては、磁極3の外周面11と主コイル5の間に補正コイル17を挿入している。従来は、磁極面補正コイル13は図14に示すように磁極3の平面部とミッドプレート14との間に、或いは図15に示すように加速空洞部補正コイル15を加速空洞7とミッドプレート14との間ないし加速空洞部補正コイル16を加速空洞7とヨーク天井9との間に挿入していた。

【0036】本実施の形態は図14に示す従来の位置にも加え、補正コイル17を磁極3の外周面11と主コイル5との間にも挿入する。これにより、各補正コイル13、17が発生する磁界を全合計で増加させることが可能である。これにより、磁極面補正コイル3のコイル径を大きくする必要が無く、また図16に示す補正鉄板12を用いる必要がなくなる。

【0037】図1の例では、補正コイル17はソレノイド型コイルの例を示した。この補正コイル17は主コイル5とは異なる位置にあるため、異なる分布を有する。従って、補正コイル17に流す電流の値の調整により、等時性磁界への補正が可能である。

【0038】補正コイル17は、超電導コイルである主コイル5の近傍に配置され冷却が容易であるため常電導コイルで構成しても良い。しかし、より大きな磁界を得ようとするならば超電導コイルで構成しても良い。なお、主コイル5を超電導コイルで構成した場合は、磁極3は4T程度と完全飽和の状態にある。従って、補正コイル17の磁界分布はほぼ空心コイルと同様に扱える。

【0039】また、図1の例では補正コイル17は1対のみ示したが、2対以上で構成しても良い。更に、補正コイル17は一般に1対のコイルを、ミッドプレーン14に対して対称に配置して構成する。

【0040】なお、Z軸に沿った非対称磁界を補正する場合であれば、補正コイル17をミッドプレーン14に対し非対称に配置しても良い。

【0041】実施の形態2

図2(a)はZ軸を中心とした円周方向20に図1に示す補正コイル17を21～26、27～32に分割し、ミッドプレート14に対して対称に配置した状態を示す。ここで、分割したコイル21～26をそれぞれ第1の補正コイル～第6の補正コイル、コイル27～32をそれぞれ第7の補正コイル～第12の補正コイル12と呼ぶ。

【0042】尚、図2(b)において、33は超電導コ

イルである主コイル5を収納するクライオスタットの壁面である。

【0043】実施の形態1では、補正コイル17による等時性磁界への補正の例であった。本実施の形態は、補正コイル17による取り出し半径近傍の1次ハーモニック磁界の補正について述べる。

【0044】図2(a)の補正コイル17は、ミッドプレーン14に対し対称に配置し、かつ周方向に沿って分割して配置した第1の補正コイル21～第6の補正コイル26、第7の補正コイル27～第12の補正コイル32を有する。ミッドプレーン14に対し対称に配置した第1の補正コイル21から第6の補正コイル26と、第7の補正コイル27から第12の補正コイル32のそれぞれに電流が、図2(b)に示す様に同じ大きさで同方向に流れるようにする。これら補正コイルに流れる電流のリーターンは、図2(b)に示す様によりミッドプレーン14から離れた位置になる。図2(b)に示すコイル巻線配置の断面図から明らかなように磁界の取り出し半径近傍でZ方向の磁界を発生できる。

【0045】なお、図2(b)において、主コイル5を超電導コイルの場合で示しているため、33は超電導コイルを収納するクライオスタットの壁面を表している。しかし、主コイル5は常電導コイルでも良い。なお、磁極3が存在するが、実施の形態1でも述べた様に、主コイル5は4T近い磁界であり、完全飽和の状態にあるため、ほぼ空心コイルに近い磁界を補正コイル17により発生できる。

【0046】更に、周方向に分割した第1の補正コイル21～第6の補正コイル26、第7の補正コイル27～第12の補正コイル32は、図2(c)に示す様に電流を変化させる。特に、Z軸に対し180度回転対称位置の補正コイル、例えば第1の補正コイル21と第4の補正コイル24とは電流の大きさは同じであるが、電流の向きは反転させる。この電流分布により周方向に $\cos \theta$ で変化する磁界を発生できる。この発生磁界を示した図が図3のコサインカーブで示す図である。 $\theta$ 方向に $\cos \theta$ で変化していることが分かる。

【0047】この磁界は1次ハーモニック磁界35と呼ばれている。磁極3の製作誤差等により、この磁界が発生した場合、この磁界とは反対方向の磁界が発生する様に第1の補正コイル21から第12の補正コイル32を上記の様に周方向に変化させた電流分布で励磁すれば、上記誤差磁界を補正できる。また、コイルであるので、各コイルの電流を順次変化させることにより1次のハーモニック磁界の位相、強度がどのような成分になっても補正鉄板12を設けることなく、1次のハーモニック誤差磁界を補正できる。

【0048】補正コイル17は周方向に6分割の例を示したが、周方向に更に細かく分割すれば、より細かく1次ハーモニック磁界の位相は制御可能である。また、補

正コイル17を更に細かく分割し、コイルの電流も周方向に $\cos(2\theta)$ に比例する様にして電流を流せば、図3の下図に示す様に、周方向に $\cos(2\theta)$ で変化する磁界、2次のハーモニック磁界を発生できる。これにより、磁極等の製作誤差で発生する2次のハーモニック誤差磁界の補正が可能になる。以下、コイルの分割数を増加させることにより、更に高次の磁界も発生可能である。

【0049】また、上記電流に加え、各コイルとも同方向の電流を加えれば、周方向には一様で、径方向に変化する磁界を与えることができ、等時性磁界への補正にも利用できる。なお、図2(a)の例では、第1の補正コイル21～第6の補正コイル26のコイル巻線、第7の補正コイル27～第12の補正コイル32のコイル巻線はZ軸を中心に周方向全周に沿って連続的に存在しているが、間欠的に存在させても良い。

【0050】実施の形態3

補正コイル17に電流を流し磁界を発生させる場合、補正コイル17の分割数が増加するほど各補正コイルに電流を流す電源の数が増加しコストアップの要因となった。本実施の形態では、補正コイル17の分割数の増加に関わらず電源の数を低減させる電源の設置方法について説明する。図4は本実施の形態における電源と補正コイル17との接続方法を示す図である。図において40は補正コイルに磁界発生の電流を流す電源である。

【0051】実施の形態2では、図2(c)により、1次のハーモニック磁界を発生する補正コイル17のコイル電流の向きについて説明した。これをまとめると、以下の様な2種類の電流配置がある。

①図2(c)に示す様に、Z軸に対し180度回転対称位置の補正コイル、例えば第1の補正コイル21と第4の補正コイル24とは、電流の大きさは同じであるが、電流の向きは反対である。

②図2(a)に示す、ミッドプレーン14に対し対称に配置した、第1の補正コイル21から第6の補正コイル26の電流と、第7の補正コイル27から第12の補正コイル32の電流は、同じ大きさで同方向に流れる様に配置する。従って、①、②とも、電流の大きさは同じである。従って、電源40を共通化できる。この様子を示した図が図4である。この結果、電源40をコイルに直列に接続すれば、電源40の個数を低減できる。更に、図4の上の図と下の図も電流が同じため、直列に接続できる。即ち、4個のコイルを直列に接続でき、電源の数をコイル数の1/4に低減できる。

【0052】実施の形態4

補正コイル17は図2に示す様に、複雑な構造であり、固定化されたクライオスタットの壁面を介しての巻線作業は容易でない。本実施の形態では、容易な巻線作業による補正コイルの製作方法について説明する。

【0053】図5(a)～(c)は本実施の形態におけ

る補正コイルの巻線方法を説明する図である。図において、42は巻枠、44は補正コイル17を構成するコイル巻線である。補正コイル17の製作時、図5(a)に示す様に、まず巻枠42にコイル巻線44を巻回する。この場合、巻枠42にはコイル巻線44を巻くための溝あるいは突起等が設けられていれば、巻線が容易である。また、第1補正コイル21～第12の補正コイル32毎にコイル巻線44を別途製作しておき、巻枠42にコイル巻線44をネジ止め等により取り付けても良い。

【0054】巻枠42にコイル巻線44を巻回して補正コイル17を作成後に、図5(b)に示す様に、補正コイル17を取り付けた巻枠42を、電磁石に挿入後、3の磁極3及びヨーク天板10を挿入すれば良い。完成後の電磁石を図5の左下図に示す。

#### 【0055】実施の形態5

図6は円形加速器用電磁石を搭載した回転ガントリーの全体構成を示す斜視図である。図において、50は回転ガントリー、52は回転ガントリーの回転角 $\theta$ であり、水平面からの角度である。54はビーム輸送系であり、56はビームを照射する患者である。

【0056】図7は回転ガントリーに円形加速器用電磁石を搭載した場合に発生する1次ハーモニック磁界を説明する図である。図において、58は円形加速器用電磁石の中心Z軸、60は主コイル5の中心Z軸、62は円形加速器用電磁石の中心Z軸と主コイルの中心Z軸とのずれ $\delta$ である。

【0057】次に、回転ガントリーについて概説する。円形加速器用電磁石1から取り出されたビームは、ビーム輸送系54を通過し、ガン患者56に照射される。ビームを患部に集中して照射するため、ビームは回転させて照射する必要がある。このため、回転ガントリー50が必要である。回転ガントリー50はビーム照射系54を回転させる必要があり大型になる。

【0058】これを小型化するため、図6の例では回転ガントリー50に円形加速器用電磁石1を搭載した構造を採る。なお、回転ガントリー50に円形加速器用電磁石1を搭載するため、円形加速器用電磁石1のZ軸は水平方向を向く。

【0059】上記、回転ガントリー50に円形加速器用電磁石1を搭載し、かつ主コイル5を超電導コイルとした場合、1次のハーモニック磁界が新たに発生する。この発生の理由について図7で説明する。主コイル(超電導コイル)5を常温空間に対して支持するサポート部は、熱侵入を低減させるため極力細い構成としている。このためサポート部は重力により、径方向に撓む。そのため、図7では円形加速器用電磁石1の中心軸であるZ軸は水平方向を向いており、径方向は上下方向となる。

【0060】一方、磁極3はヨーク天板9、ヨーク10に固定している。このヨーク天板9は従来例でも述べた様に、分厚い鉄で構成しているため、重力による撓みは

無視できる。即ち、円形加速器用電磁石1の中心Z軸58と磁極3の中心軸とは一致する。

【0061】これらにより、主コイル中心軸60と円形加速器用電磁石1の中心Z軸58とは図7に示す様に $\delta$ ずれることになる。円形加速器用電磁石1の中心Z軸を基準とし、例えば取り出し半径で周方向に1周した分布を評価すると、このずれ $\delta$ により、図7の下図に示す様に、1次のハーモニック磁界35が発生する。

【0062】回転ガントリー50が回転しなければ、補正コイル17でこのまま補正すれば良いが、実際には回転ガントリー50は回転する。このため、円形加速器用電磁石1の中心Z軸58を基準にすると主コイル5が左記Z軸に対し回転する様に見える。即ち、回転毎に1次のハーモニック磁界の位相がずれる様に見える。このため、1次のハーモニック磁界を補正鉄板で補正することは不可能で、補正コイルで1次のハーモニック磁界を、回転ガントリーの回転角に応じてアクティブに補正する必要がある。

【0063】このように補正を行うため、図8に示した制御装置を用いる。図において、64は回転ガントリー50の回転角 $\theta$  (図6の52)の検出装置であり、エンコーダ等である。66はこの回転ガントリー50の回転角 $\theta$ に基づき、補正コイル68の電流値を決定し、電源40から出力される電流を制御する制御部、68は補正コイルである。

【0064】回転ガントリー50の回転角 $\theta$ に対応して、1次のハーモニック磁界の大きさを予め磁界測定等で把握しておく。これにより、補正コイル68の電流値も決まる。回転ガントリー50の回転角 $\theta$ から、制御部66は電源電流値を決定し、電源40から出力電流値を制御する。なお、上記例ではエンコーダ等により回転角を実測すると述べたが、回転角は実測値ではなく、設定値を用いても良い。

#### 【0065】実施の形態6

図9は補正コイル17の回転ガントリー50の回転角 $\theta$ に対応した電流を示した図である。上記実施の形態5では、回転ガントリー50の回転角 $\theta$ に応じて、アクティブに補正コイル68の電流値を変化させると述べた。この補正コイル68が主コイル5と磁極3間に配置したコイル17であると、特に取り出し半径近傍の磁界を発生できるため、この位置の補正が容易になる。

【0066】なお、円形加速器用電磁石のZ軸が水平方向に向くため、補正コイル17のZ軸も図9(a)に示す様に水平方向を向く。また、図9(b)は、コイル21、22、23、及び27、28、29に分割された補正コイルにおける回転ガントリー50の回転角 $\theta$ に応じた電流変化も示す。図9(b)に示すコイル電流により、回転ガントリー50の回転角 $\theta$ に対応した1次のハーモニック磁界を発生させることができる。

#### 【0067】実施の形態7



図10は磁極表面補正コイルを配置した円形加速器用電磁石の一部断面図である。図において、80は磁極3とミッドプレーン14間に配置した磁極表面補正コイルである。実施の形態5では、主コイル5と磁極3間に配置した補正用コイルについて述べたが、本実施の形態では別の形状のコイルによる補正コイルについて述べる。図10に示す磁極表面補正コイル80でも1次のハーモニク磁界を発生できる。この磁極表面補正コイル80は、図13及び図14に示すの磁極表面の補正コイル13とは異なる巻線方法になる。例えば図14に示す磁極表面の補正コイル13は、等時性磁界の補正用であり、周方向へは電流が変化しないとしていた。

【0068】しかし、図10に示す磁極表面コイル80は、図2に示す補正コイル17と同様に、周方向にコイルを分割し、周方向に電流が変化する様にコイル電流を通电する。これにより、1次のハーモニク磁界を発生できる。更に、回転ガントリー50の回転角 $\theta$ 毎に周方向に分割された各コイルの電流値を変化させる。これにより、回転ガントリー50の回転時に発生する1次ハーモニク磁界をアクティブに補正できる。

#### 【0069】実施の形態8

図11は本実施の形態に係る加速空洞表面補正コイルの図である。82はヨーク天板9と加速空洞7の間に配置した加速空洞表面コイルであり、84はミッドプレーン14と加速空洞7の間に配置した加速空洞表面コイルである。

【0070】本実施の形態では上記各実施の形態とは異なる別の形状のコイルについて述べる。図11に示す様に、加速空洞7近傍に配置した加速空洞表面コイル82、84でも1次のハーモニク磁界を発生できる。このコイルは、図10に示した磁極表面コイル80と同様に、周方向に電流が変化する様にコイルを分割(図2(a)を参照)し、コイル電流を通电する。これにより、ミッドプレーン14上に1次のハーモニク磁界を発生できる。

【0071】更に、回転ガントリー50の回転角 $\theta$ 毎に周方向に分割されたコイル電流値を変化させる。これにより、回転ガントリー50の回転時に発生する1次ハーモニク磁界を実施の形態と同様にアクティブに補正する。

#### 【0072】

【発明の効果】請求項1の発明によれば、電磁石の中心に注入されたビームを偏向させてビーム軌道面上を周回させる磁界を発生させる主コイルと、ビーム軌道面上を周回中にビームに電界を与え、ビーム進行方向に加速する加速空洞と、前記ビームの周回方向に沿って前記加速空洞と交互に配置される磁極を備え、前記磁極の外周と前記主コイルとの間に補正コイルを挿入して円形加速器用電磁石を構成したので、磁界を補正するための充分な強度の磁界をビーム取り出し半径付近で発生させること

ができるという効果がある。

【0073】請求項2の発明によれば、補正コイルを磁極の周面方向に沿って複数に分割して挿入し、この分割した補正コイルの少なくとも一部で電流値または電流方向を異ならせるようにしたので、容易に1次のハーモニク誤差磁界を補正できるという効果がある。

【0074】請求項3の発明によれば、ビームの周回面を対象面とし、この対象面を介して対向配置された第1の補正コイル群と第2の補正コイル群間における補正コイルで電流値が同一の補正コイルを電流源に対して直列接続したので、補正コイルの増加に拘わりなく電流源の数を減少させることができるという効果がある。

【0075】請求項4の発明によれば、補正コイルは円筒状の巻枠にコイル巻線を巻回して形成した後に、円筒内に磁極挿入させることで、円形加速器用電磁石に対する補正コイルの組み込みが容易になるという効果がある。

【0076】請求項5の発明によれば、回転ガントリーに搭載された際に、補正コイルの電流値を前記回転ガントリーの回転角度に応じて可変させる制御手段を備えたので、回転ガントリーの回転角に応じた1次のハーモニク磁界をアクティブに補正できるという効果がある。

【0077】請求項6の発明によれば、補正コイルを磁極とビーム軌道面との間に配置したことで、回転ガントリーの回転角に応じた1次のハーモニク磁界をアクティブに補正できるという効果がある。

【0078】請求項7の発明によれば、補正コイルを加速空洞表面近傍に配置したことで、回転ガントリーの回転角に応じた1次のハーモニク磁界をアクティブに補正できるという効果がある。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の請求項1の円形加速器用電磁石の断面図である。

【図2】 本発明の請求項2の補正コイルの図である。

【図3】 本発明の請求項2の補正コイルが発生する磁界である。

【図4】 本発明の請求項3の補正コイルの電源との結線図である。

【図5】 本発明の請求項4の補正コイルの組立法の図である。

【図6】 本発明の請求項5の円形加速器用電磁石の斜視図である。

【図7】 本発明の請求項5の誤差磁界発生の説明図である。

【図8】 本発明の請求項5の構成図である。

【図9】 本発明の請求項6の補正コイルと補正コイルに流れる電流波形図である。

【図10】 本発明の請求項7の円形加速器用電磁石の断面図である。

【図11】 本発明の請求項8の円形加速器用電磁石の



断面図である。

【図12】 従来の発明の円形加速器用電磁石の斜視図である。

【図13】 従来の発明の円形加速器用電磁石の断面図である。

【図14】 従来の発明の円形加速器用電磁石の断面図である。

【図15】 従来の発明の円形加速器用電磁石の斜視図である。

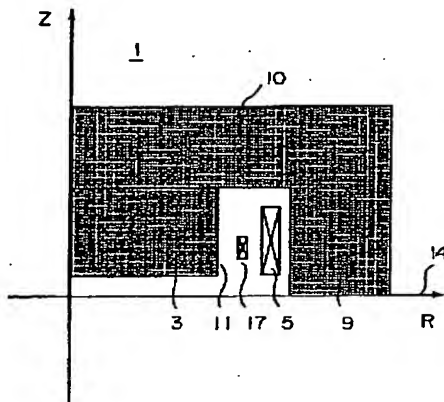
【図16】 従来の発明の円形加速器用電磁石の斜視図\*10

\*である。

【符号の説明】

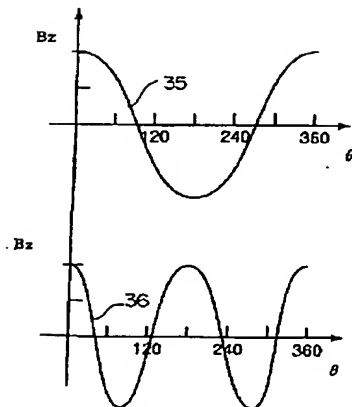
1 電磁石、3 磁極、5 主コイル、6 Z軸、7 加速空洞、11 磁極外周部、13 磁極面補正コイル、14 ミッドプレーン、15 加速空洞部補正コイル(1)、16 加速空洞部補正コイル(2)、17 補正コイル、20 円周方向、35 1次ハーモニック磁界、36 2次ハーモニック磁界、42 巻棒、44 コイル巻線、50 回転ガントリー、52 回転ガントリーの回転角 $\theta$  g。

【図1】



- 1: 円形加速器用電磁石
- 3: 磁極
- 5: 主コイル
- 9: ヨーク
- 11: 磁極外周部
- 17: 補正コイル

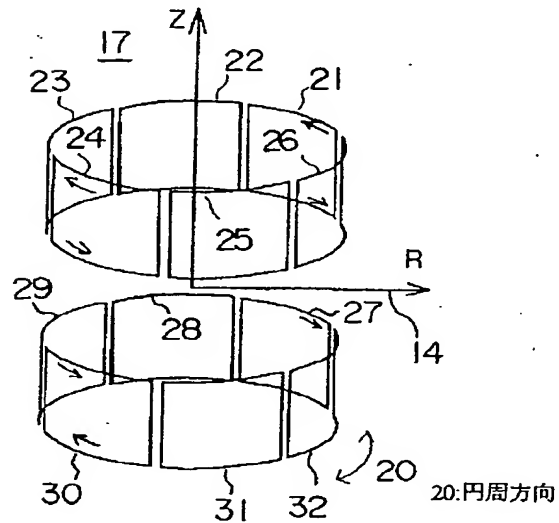
【図3】



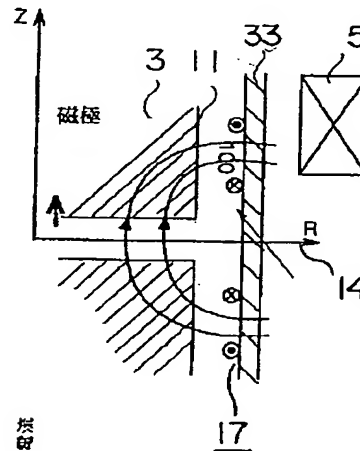
- 35: 1次ハーモニック磁界
- 36: 2次ハーモニック磁界

【図2】

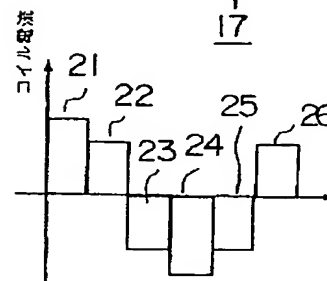
(a)



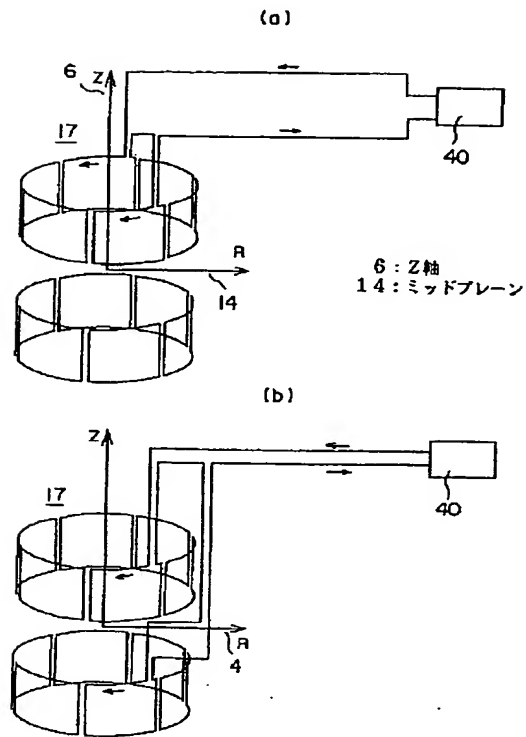
(b)



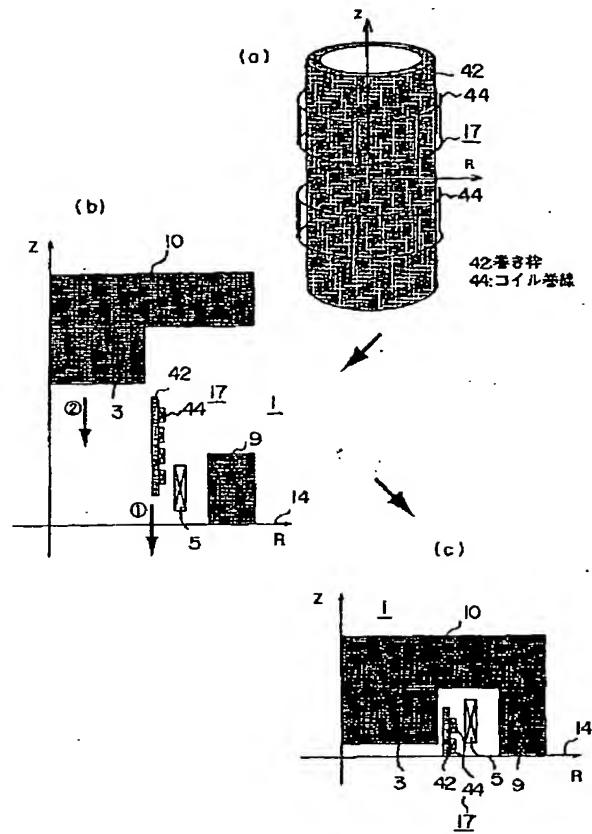
(c)



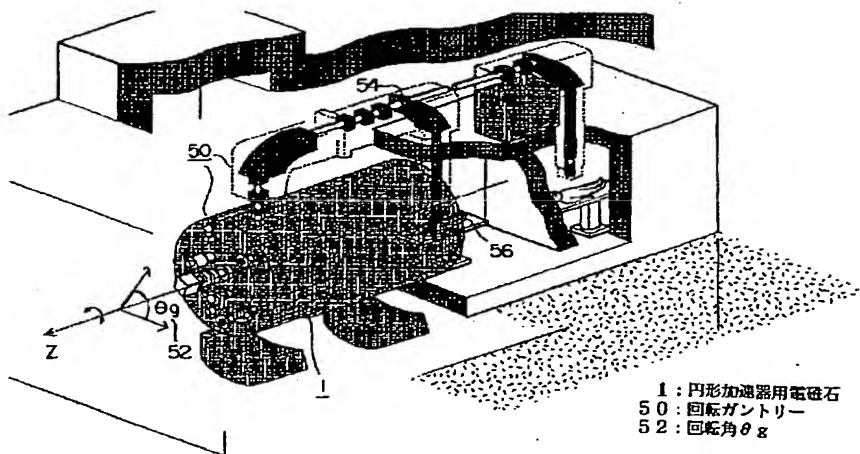
【図4】



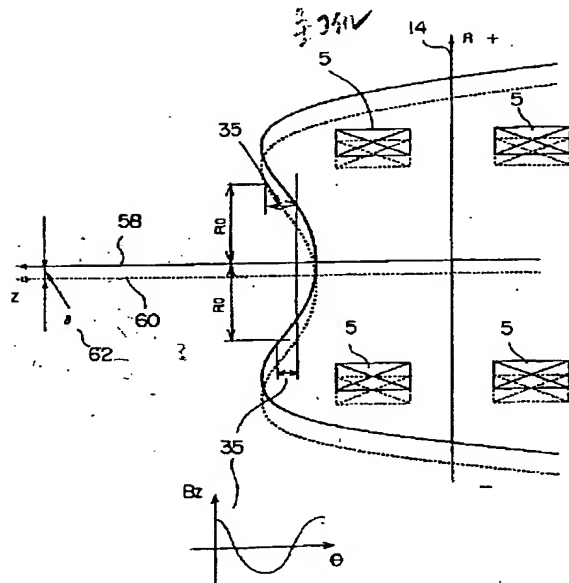
【図5】



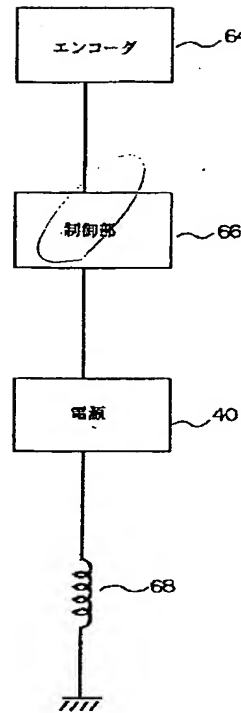
【図6】



【図7】

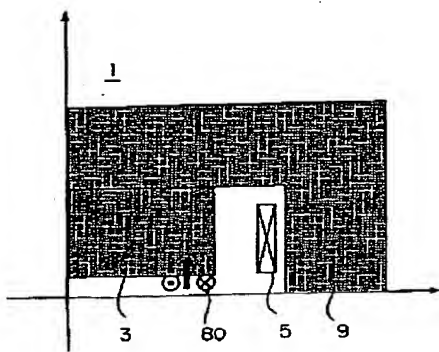


【図8】



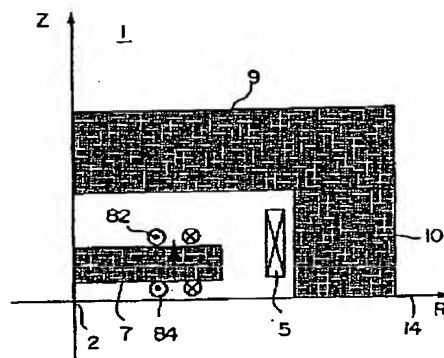
68: 補正コイル

【図10】



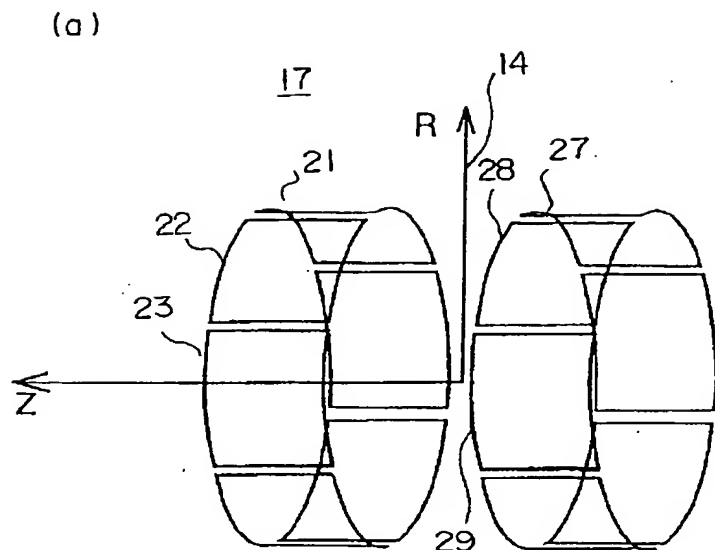
1: 円形加速器用電磁石  
80: 磁極表面コイル

【図11】

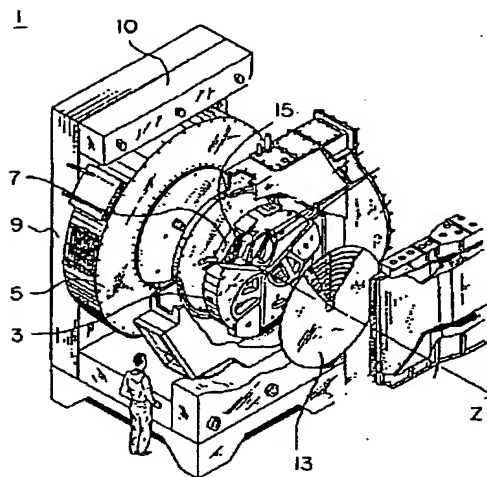


1: 円形加速器用電磁石  
82: 加速空洞表面コイル1  
84: 加速空洞表面コイル2

【図9】

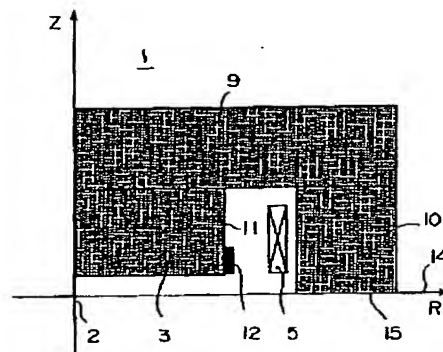
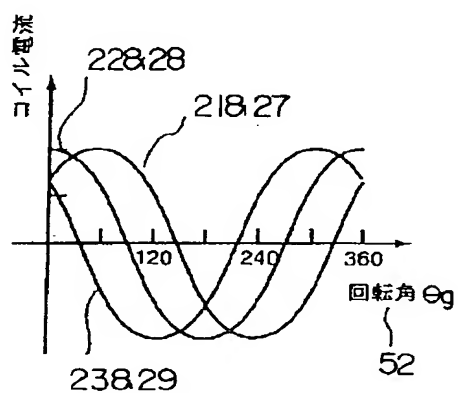


【図13】

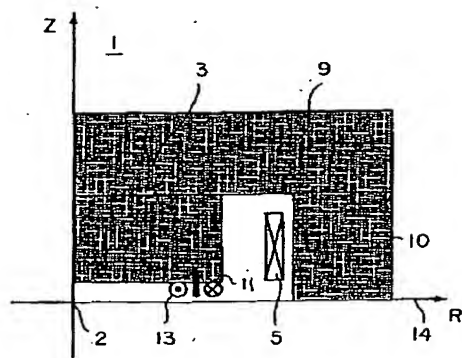


【図16】

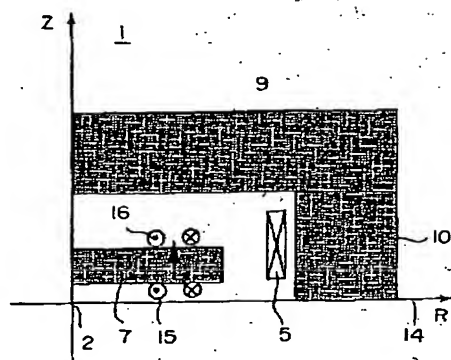
(b)



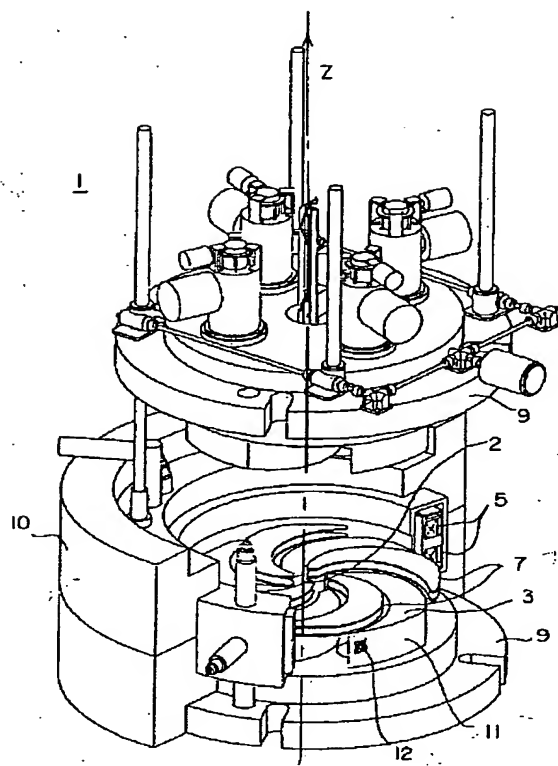
【図14】



【図15】



【図12】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**